

TEMA 8**MATERIALES COMPUESTOS (“COMPOSITES”)**

Introducción. Materialas reforzados por partículas: Hormigón, asfalto y cermets. Materiales reforzados por fibras: Fibras de vidrio, carbono y aramida. Procesado de composites con fibras. Materiales laminares. Estructuras “sandwich”. Nuevos materiales de matriz cerámica y matriz metálica

Los **materiales compuestos** o **composites** surgen como respuesta a la demanda de nuevos sistemas con propiedades que son imposibles de reunir en un solo tipo de material. Así por ejemplo, para la industria aeronáutica se solicitan materiales que sean resistentes y rígidos (como los metales), a la vez que ligeros (como los polímeros) y que resistan las altas temperaturas y la corrosión (como los cerámicos). Los composites son materiales multifásicos que conservan, al menos parcialmente, las propiedades de sus sistemas constituyentes, y diseñados para que presenten la combinación de propiedades más favorable. Sobre la definición de lo que es un material compuesto, los diferentes autores no se ponen totalmente de acuerdo. Así, mientras que para unos autores la madera o los huesos son materiales compuestos, para otros no lo son por su carácter natural. La definición más aceptada, aunque ligeramente ambigua, dice que *“un material compuesto es un sistema material integrado por una combinación de dos o más micro o macroestructuras que difieren en forma y composición química, y que son esencialmente insolubles entre sí”*.

Normalmente los composites se clasifican en tres categorías de acuerdo a sus formas: materiales **particulados** (formados o reforzados por agregados de partículas), **fibras** (materiales reforzados por fibras) y materiales **estructurales** (laminares o “sandwich”).

Materiales reforzados por Partículas

La adición de partículas de mayor o menor tamaño a una determinada matriz es un recurso habitualmente utilizado para obtener materiales más resistentes. Las partículas de refuerzo son habitualmente más duras y resistentes que la matriz, se cohesionan fuertemente con ésta y mejoran apreciablemente sus propiedades mecánicas. Según el tamaño de las partículas, pueden distinguirse dos tipos de composites particulados diferentes: los **composites reforzados por dispersión** y los **composites con partículas grandes**.

Composites reforzados por dispersión: Presentan partículas de tamaño muy pequeño (< 100 nm.), homogéneamente distribuidas por toda la matriz. Su efecto es similar al que produce el fenómeno de la precipitación o envejecimiento en una aleación metálica. Las pequeñas partículas, aunque no son coherentes con la matriz, actúan a nivel atómico-molecular impidiendo la propagación de las dislocaciones, con el consiguiente aumento de la dureza y la resistencia a la deformación plástica y a la tracción. Pero en cualquier caso, es la propia matriz la que soporta mayoritariamente las fuerzas que actúan sobre ella.

Normalmente, este tipo de reforzamiento se aplica en metales y aleaciones metálicas, utilizándose generalmente óxidos metálicos como fase dispersiva. Obviamente deben

ser materiales duros, inertes para no reaccionar con la matriz y poco solubles en ésta (porque la solubilidad favorece la formación de enlaces indeseables entre la matriz y las partículas). El endurecimiento obtenido en estos materiales no es tan elevado como el que puede conseguirse por precipitación. Si embargo, tiene la ventaja de que se mantiene a altas temperaturas durante periodos de tiempo prolongados. Recordemos que en los materiales envejecidos, los tratamientos térmicos reducen su resistencia al absorber una fase a la otra.

Ejemplos importantes de composites reforzados por dispersión lo constituyen el sistema Al-Al₂O₃ (14 %), utilizado en reactores nucleares, el sistema Ni-ThO₂ (3 %), aplicado en componentes de turbinas, y el sistema W-ThO₂ (ZrO₂), que se aplica en filamentos y resistencias calefactoras. Todos estos materiales deben ser preparados por metalurgia en polvo, dadas sus elevadas temperaturas de fusión y dureza.

Composites con partículas grandes: También se les denomina *composites aglomerados* y *composites verdaderamente particulados* (“*true particulated composites*”). Dado su tamaño, la interacción de estas partículas con la matriz no tiene lugar a nivel atómico o molecular, y sus efectos se producen a nivel macroscópico. Las partículas restringen los movimientos de la matriz que les rodea y van a soportar una parte importante de las fuerzas que se ejercen sobre ella. Evidentemente, su efectividad aumenta con la cohesión matriz-partícula que se establezca.

Las partículas pueden tener geometrías y tamaños diferentes, pero se debe tratar de que presenten la misma dimensión en todas las direcciones, para evitar orientaciones con mayor fragilidad. Además hay que tener en cuenta que la cohesión con la matriz será mejor cuanto menor sea su tamaño y más homogénea sea su distribución. Por otra parte, se pueden modular las propiedades mecánicas del composite preparado teniendo en cuenta que, de acuerdo a la **regla de las mezclas**, las propiedades finales dependen del volumen relativo de ambas fases.

Se preparan este tipo de composites especialmente sobre matrices metálicas y poliméricas, utilizando partículas cerámicas como refuerzo, aunque también hay materiales muy importantes con matriz cerámica. Algunos de estos materiales se vienen utilizando desde hace muchos años, caso del **hormigón** o el **asfalto**, otros por el contrario son nuevos materiales de reciente diseño, caso de los **cermets**.

Entre los primeros ejemplos conocidos de materiales reforzados por partículas se encuentra el caucho vulcanizado reforzado por hollín. El hollín está compuesto por pequeñas partículas esféricas de carbono que se producen en la combustión incompleta de la madera o los combustibles fósiles. La adición de este material tan barato mejora enormemente la resistencia al desgaste y al calor, así como la dureza y resistencia de los neumáticos vulcanizados. Hay que tener en cuenta que en un neumático de automóvil el porcentaje en volumen de hollín puede alcanzar el 30 %. En materiales poliméricos más caros se añaden otros reforzantes más limpios, como carbonato de calcio, esferas de vidrio y diferentes arcillas.

En la industria electrónica también se utilizan ampliamente composites reforzados por partículas para lograr contactos eléctricos permanentes y seguros. Estos materiales deben presentar una buena conductividad y a la vez una gran resistencia a la erosión, para impedir que después de un número elevado de conexiones-desconexiones el

contacto se desgaste y deje de ser efectivo. El material más comúnmente empleado es un composite fabricado por sinterización de partículas de wolframio y cementado con plata, de manera que se combinan la alta resistencia del primero con la excelente conductividad de la segunda.

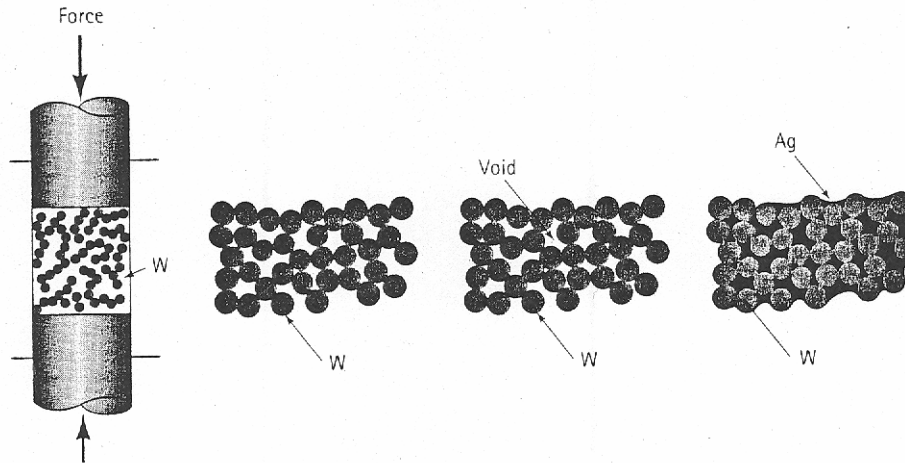


Figura 1.- Fabricación de un contacto eléctrico W-Ag.

Hormigón

El hormigón es un material compuesto particulado en el que tanto la matriz (cemento) como las partículas (grava y arena) son materiales cerámicos. Su utilización como material de construcción se basa en su dureza, bajo coste, resistencia al fuego y la posibilidad de prepararlo in situ con la forma deseada (incluso sumergido en agua). Por el contrario, presenta una deficiente resistencia a la tracción, es muy frágil y presenta dilataciones y contracciones importantes en función de los cambios de temperatura ambientales.

La composición del hormigón puede variar considerablemente en función de su futura aplicación, pero en términos generales se puede decir que su composición en volumen es: 7-15 % de cemento, 31-51 % de partículas gruesa (grava), 24-30 % de partículas finas (arena), 14-21 % de agua y 0.5-8 % de aire. El cemento utilizado más habitualmente es el cemento Portland. La pasta que forma con el agua debe recubrir por completo las partículas agregadas para lograr una buena cohesión. Una deficiencia de agua dificulta el mezclado y se traduce en uniones deficientes entre partículas, además de impedir que el cemento se hidrate en su totalidad. Un exceso de agua favorece la porosidad, lo cual se traduce en un incremento de la fragilidad del hormigón preparado. Por esos poros penetra el agua y, con sus variaciones de volumen en los ciclos de congelación-descongelación, contribuye a la aparición de grietas.

Los agregados constituyen hasta el 80 % del hormigón, lo cual supone de entrada una reducción de los costes muy importante, pues su precio es muy inferior al del cemento. Pero no son un simple material de relleno, el entramado compacto, que se consigue mediante la adición de partículas de dos tamaños diferentes, mejora sensiblemente las propiedades mecánicas del hormigón frente a las del cemento. Las partículas utilizadas deben ser resistentes, preferentemente de formas angulares, y limpias de arcilla o cal en

superficie porque estas sustancias dificultan la unión con el cemento. El tamaño de las partículas debe estar en proporción con la estructura que se va a fabricar. Conviene que la piedra utilizada sea lo más grande posible para reducir el área superficial, pero no debe superar nunca el 20 % del espesor total de la estructura. Para hormigones ligeros se suelen utilizar escorias de fundición como agregados, por el contrario si lo que se busca es una alta densidad, por ejemplo para la construcción de paredes de reactores nucleares, se utilizan minerales ferrosos pesados.

La presencia de aire ocluido es también de gran importancia para mejorar la capacidad de trabajo de los hormigones y para incrementar su resistencia a las congelaciones y deshielos. El aire que queda ocluido durante el mezclado depende en principio del tamaño de las partículas, disminuyendo con éste. El porcentaje natural suele ser del 1-2.5 %, sin embargo puede incrementarse hasta un 8 % añadiendo materiales que favorezcan el proceso al disminuir la tensión superficial del agua.

El hormigón, como todos los materiales cerámicos, se caracteriza por una mayor resistencia a la compresión que a la tensión (15 veces mayor). Por este motivo, cuando se va a utilizar en un sistema que deba soportar la tensión (una viga, por ejemplo) es preciso reforzarlo. Para este fin se colocan barras, alambres o mallas de acero (arrugado para mejorar la adherencia) en el material antes de fraguar. Este hormigón reforzado por acero se denomina **hormigón armado** y es muy resistente a la tensión y a la cizalladura, pues la armadura lo mantiene cohesionado aunque se produzcan grietas.

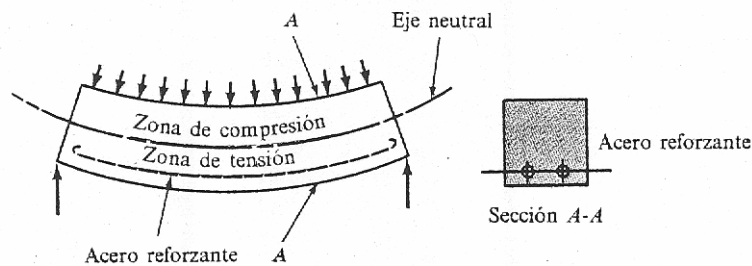


Figura 2.- Efecto de una carga sobre una viga.

La resistencia a la tensión del hormigón armado puede ser incrementada por procesos de tensionado sobre los refuerzos de acero. Así se preparan el **hormigón pretensado** y el **hormigón postensado**. Para la preparación del hormigón pretensado se coloca un alambre de acero (**tendón**) sometido a una fuerte tensión en el molde. Una vez endurecido el hormigón, se elimina la fuerza de tensión, con lo que el alambre se comprime y comprime también al hormigón. De esta manera, cuando el material es sometido a una nueva tensión tiene que vencer en primer lugar la fuerza compresiva residual. El **hormigón postensado** se prepara introduciendo un tubo hueco en el molde. Una vez endurecido el hormigón se introduce un tendón por el tubo y se tensiona fuertemente para que el hormigón se comprima. Finalmente, se asegura permanentemente la tensión del tendón y se rellenan los tubos con hidróxido cálcico para evitar la corrosión del acero. Este tipo de hormigones se utilizan en construcciones que precisan una resistencia especial, como pueden ser los puentes.

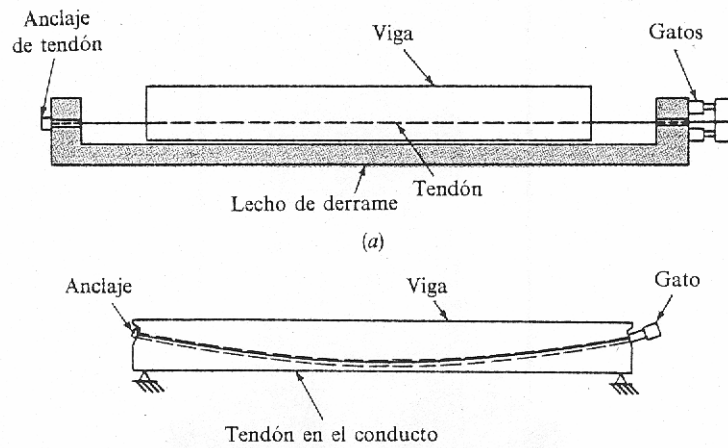


Figura 3.- Fabricación de hormigón pretensado y postensado.

Asfalto y Mezclas Asfálticas

El asfalto es un **betún**, esto es un hidrocarburo con contenidos variables en azufre (0.5-7 %), oxígeno (2-8 %) y otras impurezas, y sus propiedades mecánicas son similares a las de los polímeros termoplásticos. Se obtiene fundamentalmente como subproducto del refinado del petróleo, pero también puede obtenerse de la roca asfáltica (*roca del betún*) y de depósitos superficiales. Para facilitar su mezclado con otros elementos, disminuyendo su densidad, y hacer más rápido su endurecimiento se añaden habitualmente aditivos como gasolina y keroseno. Su rango térmico de aplicación no es tan elevado como el del cemento, sino todo lo contrario: a temperatura bajo cero se hace quebradizo y a temperaturas no demasiado elevadas puede fundir. Por este motivo, no puede utilizarse en construcción, aunque es el principal material usado en la pavimentación de las carreteras.

El asfalto, como el cemento, se utiliza de material aglutinante para la preparación de las **mezclas asfálticas**. Las partículas utilizadas como agregados (arena y grava fina, y también vidrio reciclado) deben presentar formas externas angulares y una distribución heterogénea de tamaños de grano para conseguir el máximo grado de empaquetamiento y un buen entrecruzado. La relación porcentual entre el asfalto y las partículas agregadas debe ser cuidadosamente controlada. Las mezclas habituales contienen un 5-10 % de asfalto. Contenidos mayores hacen que el material pueda deformarse bajo el peso de los vehículos. Además, en tiempo caluroso se concentrará en la superficie y fundirá con facilidad, dando lugar a desperfectos importantes en el pavimento y a la pérdida de resistencia al deslizamiento dificultando el frenado de los vehículos. Un contenido demasiado bajo en asfalto, o un mal mezclado, impedirá que las partículas se cohesionen correctamente y se producirán fácilmente desprendimientos de material.

Es importante también que en la mezcla queden espacios vacíos (2-5 % en volumen), de esta manera cuando se comprime bajo el peso de los vehículos, el asfalto puede deslizarse hacia esos espacios y no salir a la superficie, donde gradualmente se iría perdiendo. Pero si los poros son demasiados, el agua entrará por ellos y pasará a formar parte de la estructura, haciendo más quebradiza la mezcla y acelerando su deterioro.

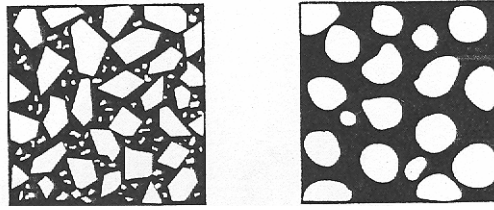


Figura 4.- Estructura ideal de una mezcla asfáltica comparada con una estructura inadecuada.

Cermets

Los **cermets** son compuestos formados por combinaciones de materiales cerámicos y metálicos. El más conocido de ellos es el llamado **carburo cementado** constituido por partículas muy duras de carburos refractarios cerámicos, básicamente WC, TiC y TaC, dispersadas en una matriz metálica de cobalto o níquel. Estos materiales son de gran utilidad en la fabricación de herramientas de corte para aceros endurecidos. El efecto cortante es proporcionado por las duras partículas cerámicas, pero como son muy frágiles no pueden ser aplicadas directamente pues no soportarían el esfuerzo de corte. Sin embargo, al incluirlas en una matriz metálica dúctil, las partículas quedan aisladas entre sí, lo que impide la propagación de las grietas y aumenta enormemente la tenacidad del material. El metal empleado debe tener también un alto punto de fusión para soportar las altas temperaturas que se generan en el corte de los aceros endurecidos.

La fabricación de un cermet comienza con la mezcla y prensado de las partículas cerámicas con el metal en polvo. La muestra compactada es calentada a elevadas temperaturas para conseguir la fusión del metal. Éste al licuarse rodea cada una de las partículas cerámicas y después de solidificarse actúa como un cemento. Hay que tener en cuenta que la proporción en volumen del material particulado puede llegar a ser del 90 %, para maximizar la acción abrasiva del compuesto. Ningún compuesto simple es capaz de reunir la combinación de propiedades que presentan los cermets.

Materiales reforzados por Fibras

La idea de reforzar un material con fibras tiene siglos de antigüedad, basta tener en cuenta que se utilizaba paja para mejorar la resistencia de los ladrillos de barro. Hoy en día, son probablemente los composites más importantes desde el punto de vista tecnológico. Básicamente, el objetivo es conseguir materiales con una elevada resistencia y rigidez, a bajas y altas temperaturas, y simultáneamente una baja densidad, lo cual se consigue empleando materiales ligeros tanto en la matriz como en las fibras. Entre los factores que deben ser tenidos en cuenta a la hora de diseñar estos materiales se encuentran *la longitud, diámetro, orientación, concentración y propiedades de las fibras, las propiedades de la matriz y la conexión entre las fibras y la matriz.*

Longitud y diámetro. Las fibras se clasifican en cortas, largas y continuas, pero en realidad es la **relación l/d** la que determina la resistencia que una fibra va a comunicar a la matriz. Es interesante que el diámetro sea pequeño para reducir el número de defectos y dificultar su propagación. También interesa que las fibras sean lo más largas posibles,

porque los extremos de las mismas soportan menos carga que las partes centrales. Por consiguiente, interesa que la relación l/d sea lo mayor posible.

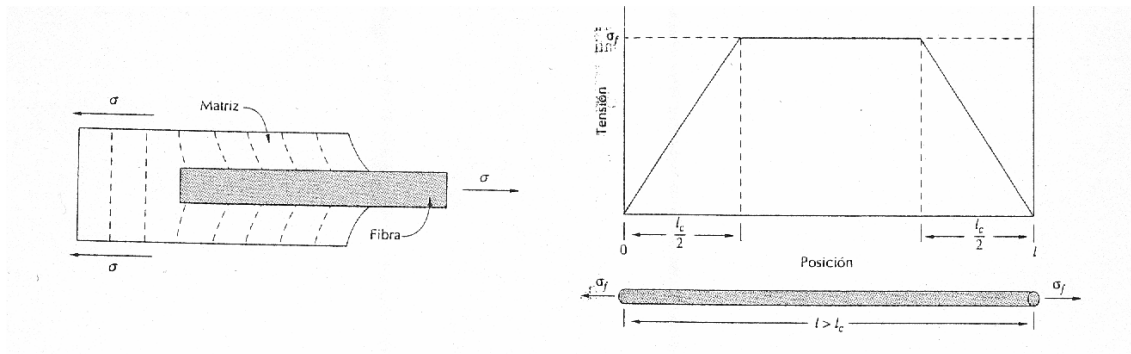


Figura 5.- Deformación de la matriz que rodea a una fibra cuando ésta es sometida a una tracción.

Para cada material, existe una longitud de fibra crítica, l_c , a partir de la cual se produce un importante aumento en la resistencia. Esa longitud crítica depende del diámetro de la fibra, de su resistencia a la tracción, σ_f y de la resistencia de la unión matriz-fibra, τ_c . En las fibras de vidrio y carbono comunes la longitud crítica suele ser del orden de 1mm.

$$l_c = (\sigma_f d) / (2 \tau_c)$$

Si la longitud de la fibra es menor que l_c el reforzamiento es muy pequeño. Por el contrario, si $l \gg l_c$ (15 veces más) se dice que la fibra es continua, y es así como resultan generalmente más interesantes en la preparación de composites.

Concentración y orientación. En principio, cuanto mayor es el contenido en fibras del material, mayor es el incremento de resistencia producido. En la práctica, sin embargo, contenidos mayores del 80 % en volumen no son convenientes pues sino las fibras no estarán completamente rodeadas por la matriz.

Las fibras cortas se introducen habitualmente al azar (caso de la fibra de vidrio), lo cual proporciona un comportamiento isotrópico y facilita mucho la preparación. Por el contrario, las fibras largas y continuas se colocan habitualmente alineadas en una determinada dirección, lo que proporciona una excelente resistencia a la tracción en esa dirección. Sin embargo, su capacidad de soportar cargas en la dirección transversal es muy pequeña. En los últimos años, es cada vez más frecuente la utilización de fibras cortas alineadas. El incremento de la resistencia es sensiblemente inferior (50 %) que el obtenido mediante fibras largas, pero su preparación es en muchos casos más barata.

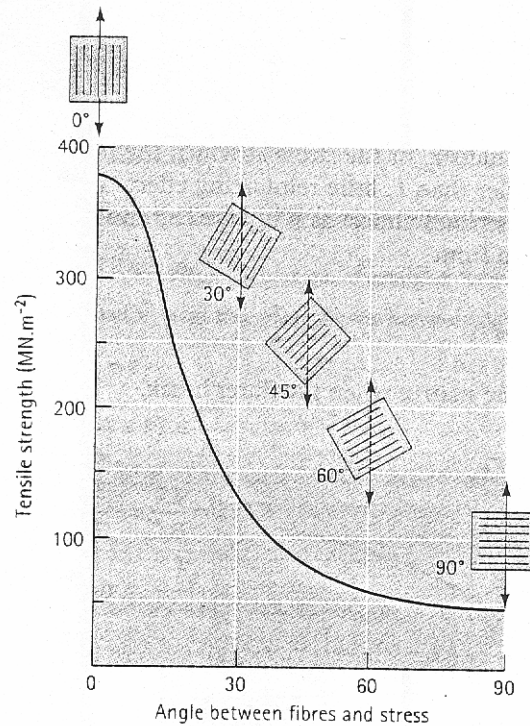


Figura 6.- Resistencia a la tracción respecto de diferentes orientaciones de la fibra.

Para corregir este defecto se recurre a la introducción de fibras largas apiladas en diferentes direcciones, o incluso formando entramados tridimensionales.

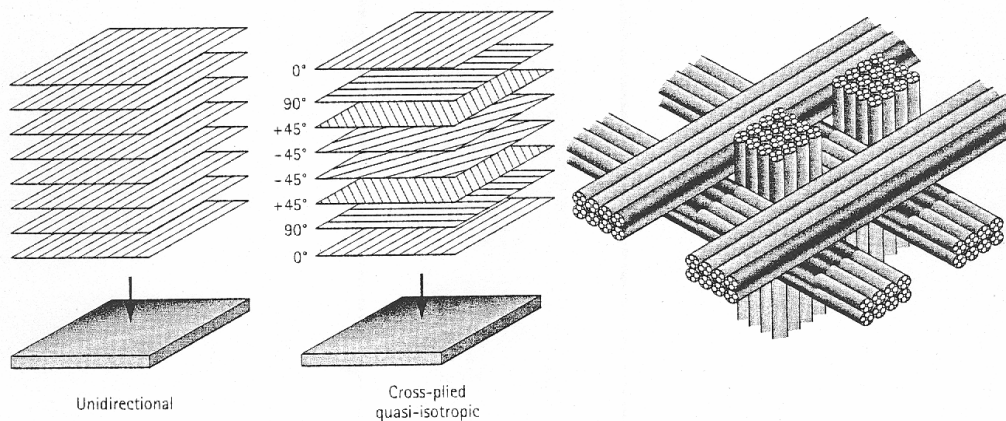


Figura 7.- Diferentes tramas bi- y tridimensionales en materiales reforzados con fibras.

Propiedades de la fibra. Generalmente se necesita de una fibra que sea resistente, indeformable y ligera. Además, si el composite va a utilizarse a altas temperaturas, se requerirá también que la fibra tenga un alto punto de fusión. De acuerdo a sus características y diámetros, las fibras se clasifican en **whiskers (triquitas), fibras y alambres**. Los whiskers son monocristales muy delgados que presentan las mayores relaciones l/d. Debido a su pequeño diámetro tienen muy pocos defectos y por tanto resistencias muy elevadas. Sin embargo, son difíciles de incorporar a las matrices y sus precios son muy elevados. Se preparan whiskers de grafito, alúmina, y carburo y nitruro de silicio, fundamentalmente. Los alambres presentan habitualmente diámetros grandes,

suelen ser de acero, wolframio o molibdeno. Este tipo de fibras constituyen los refuerzos radiales de los neumáticos y mangueras de alta presión. Las fibras son los materiales más empleados, pueden ser cerámicas (vidrio, carbono, alúmina, carburo de silico), metálicas (boro, berilio, wolframio) o poliméricas (aramidas).

Propiedades de la matriz. La matriz debe ejercer diferentes funciones: mantener las fibras en su posición más adecuada, protegerlas de daños durante el procesado y la utilización del composite, transmitir a las fibras las cargas que soporta el material, evitar que la fractura de una fibra se propague a las demás, etc. También es generalmente la responsable de las propiedades químicas, eléctricas y térmicas del composite. Por consiguiente, entre sus propiedades deben encontrarse la ductilidad, elasticidad, resistencia a la erosión, resistencia térmica, etc.

Las matrices más habituales son las poliméricas, seguidas de las metálicas, por su elevada ductilidad. Prácticamente todos los polímeros termoplásticos y termoestables se comercializan reforzados, al menos, por fibras de vidrio cortas. Entre las matrices metálicas predominan las de aluminio y cobre, y en menor medida magnesio, níquel y algunas aleaciones intermetálicas. Se utilizan en composites que operan a altas temperaturas, pero son mucho más caras que las plásticas. Algunos importantes ejemplos de nuevos materiales construidos con matrices metálicas y cerámicas se verán en el último apartado del tema.

Conexión Fibra-Matriz. La adherencia entre la fibra y la matriz debe ser máxima, tanto para evitar su deterioro (arrancado), como para que la transmisión de la carga desde la matriz a las fibras sea óptima. Normalmente, con matrices poliméricas y metálicas la adherencia es muy buena. No obstante, también pueden utilizarse recubrimientos para las fibras que favorecen sus enlaces con la matriz. Así, las fibras de vidrio y carbono suelen recubrirse de algún material orgánico (silanos, generalmente) para mejorar sus enlaces con los polímeros. También es preciso tener en cuenta que, si la fibra y la matriz no presentan similares respuestas térmicas (expansión-contracción) los enlaces se romperán con facilidad.

Fibra de Vidrio, Carbono y Aramida

El material comúnmente conocido como **fibra de vidrio** es un composite formado por fibras, continuas y discontinuas, embebidas en una matriz plástica. Son materiales con una buena relación resistencia/peso, buena estabilidad dimensional y buena resistencia al calor, frío, humedad y corrosión. Además son baratas y fáciles de fabricar. Se utilizan básicamente dos tipos de vidrio: el **vidrio E** (*eléctrico*) y el **vidrio S** (*de alta resistencia*). El vidrio E, borosilicatos de aluminio y calcio (52-56 % SiO_2 , 12-16 % Al_2O_3 , 16-25 % CaO y 8-13 % B_2O_3), es el más común y barato, y generalmente se utiliza como fibra continua. El vidrio S (65 % SiO_2 , 25 % Al_2O_3 y 10 % MgO) es más resistente y caro, por lo que se utiliza en aplicaciones más específicas como en la industria aeroespacial. La matriz plástica más utilizada es el poliéster, aunque para obtener mayores resistencias puede utilizarse el nylon (poliamida).

Estos materiales tienen una buena resistencia, pero no son rígidos y por tanto no pueden aplicarse en elementos estructurales. En general no pueden operar a temperaturas

superiores a los 200 °C porque el polímero se reblandece, aunque con matrices de poliamida pueden alcanzarse los 300 °C. Sus principales aplicaciones se hayan en la industria del automóvil (carrocerías de bajo peso), tuberías, depósitos de almacenaje y suelos industriales.

Los materiales de **fibra de carbono** son más resistentes y tenaces, pesan menos, resisten mejor la corrosión y pueden aplicarse a temperaturas más elevadas. Por el contrario son mucho más caros y normalmente sólo se preparan materiales de fibra corta. Como matriz se utiliza habitualmente una resina epoxi, aunque para aplicaciones de alta temperatura se puede utilizar una resina carbonizada (materiales carbono-carbono). La fibra de carbono proviene fundamentalmente de la calcinación (carbonización + grafitización) del *poliacrilonitrilo* (PAN). Estos materiales se utilizan en la industria del automóvil, y también en la industria aeronáutica, con objeto de reducir peso en componentes estructurales.

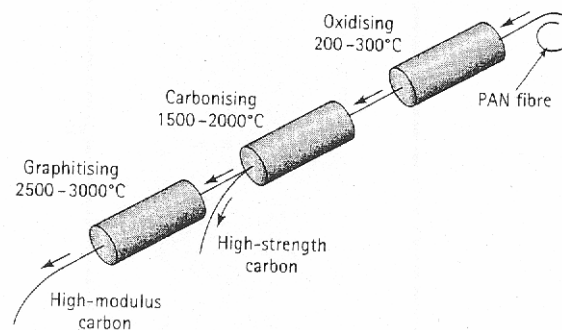


Figura 8.- Fabricación de fibras de carbono.

Se conocen como **fibras de aramida** a las fibras de poliamida aromática, cuyo ejemplo más conocido es el Kevlar. Son materiales muy ligeros que presentan una alta resistencia a la tensión y rigidez (aunque ligeramente inferiores a las fibras de carbono). Las cadenas poliméricas se mantienen unidas mediante enlaces de hidrógeno, por lo que la resistencia transversal no es buena. Por el contrario la resistencia longitudinal es excelente porque los anillos aromáticos le dan una enorme rigidez a las cadenas y éstas presentan una estructura similar a la de una barra. Se utilizan normalmente en resinas epoxi, obteniéndose materiales muy duros y resistentes que se utilizan en protección antibalística (casco y chalecos) y en la industria automovilística y aeroespacial.

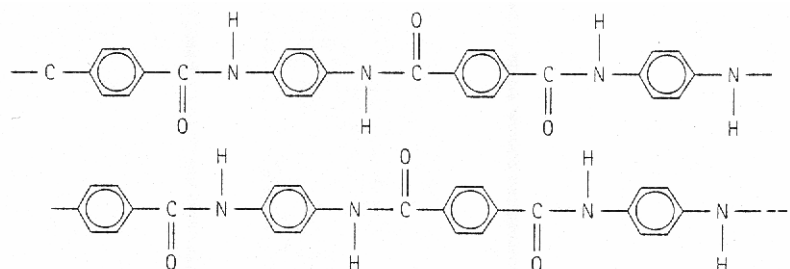


Figura 9.- Estructura del Kevlar.

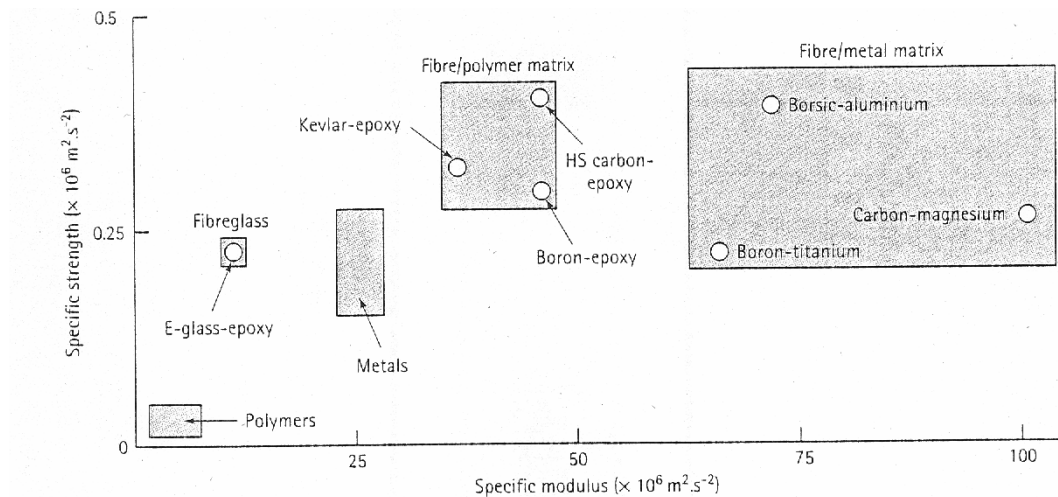


Figura 10.- Comparación de las resistencias a la tracción y los módulos elásticos de diversos materiales.

Procesado de Composites reforzados por Fibras

La fabricación de composites reforzados por fibras puede llevarse a cabo mediante diferentes métodos, que dependen de la composición y futuras aplicaciones del material. Así para la preparación de composites de fibra corta no es preciso utilizar ningún método de procesado diferente de los ya comentados en temas anteriores y generalmente se lleva a cabo un moldeado (por inyección si la matriz es polimérica) de la mezcla. Sin embargo, para la fabricación de composites de fibra larga se han tenido que diseñar métodos especiales, entre éstos destacan la **pultrusión**, la **producción con preimpregnado** y el **bobinado de filamentos**.

La **pultrusión** se utiliza para preparar materiales de forma alargada y sección (rectangular o circular) constante: tubos, vigas, raíles. La fibra, en forma de mechas normalmente, se pasan a través de un baño de resina termoestable y a continuación atraviesan por un molde que les confiere la preforma deseada y determina la proporción resina/fibra. Finalmente, el material pasa a través de un horno-molde para su curado y moldeado definitivo de forma precisa. Un mecanismo de tracción arrastra el material a través de los moldes y determina la velocidad del proceso de fabricación. Es un método continuo, fácilmente automatizable, que permite producir rápidamente y a bajo coste grandes cantidades de material, que puede ser posteriormente recortado en la forma deseada. Este método se utiliza fundamentalmente en materiales que contienen un 40-70 % de fibra en matrices de poliéster o resinas epoxi.

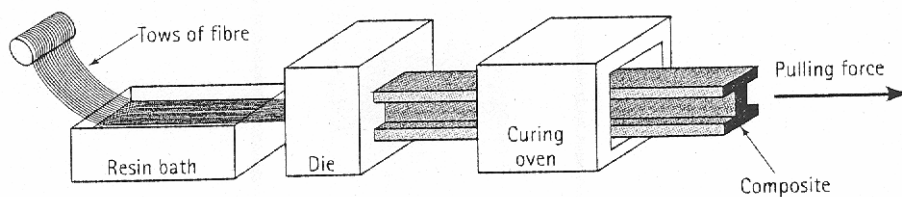


Figura 11.- Producción de composites por pultrusión.

El **preimpregnado** consiste en la fabricación de cintas con las fibras recubiertas de una matriz polimérica parcialmente curada. El procedimiento empleado para la preparación de estas cintas consiste en colocar alineadas las fibras entre dos hojas de papel o láminas metálicas muy finas, una de soporte y otra desechable, y prensarlas en caliente con la ayuda de dos rodillos. La hoja desechable se cubre previamente con una capa delgada de la resina, y con ayuda de un rasero se extiende esa resina sobre las fibras y la otra hoja formando una película uniforme. El producto final se va enrollando sobre un núcleo de cartón formando una bobina, al tiempo que se elimina la hoja desechable. Cuando se utilizan hojas metálicas normalmente no se enrollan sino que el producto final se suministra en forma de láminas. Hay que tener en cuenta que las cintas se curan por si mismas a temperatura ambiente, por lo que es preciso reducir el tiempo que dura el procesado. Al cabo de seis meses normalmente la resina se cura por completo y el material queda inservible.

Las cintas así preparadas se aplican sobre las superficies que actúan como molde, aplicando tantas capas como se necesite en función del grosor requerido. Además no suelen apilarse en la misma dirección para conseguir una resistencia isotrópica. Para que las cintas se enlacen convenientemente durante el curado se utilizan tanto la presión mecánica como gases a presión o vacío. De esta manera se fabrican habitualmente componentes estructurales de gran tamaño empleados en el fuselaje de los aviones militares, así como muchas partes grandes de coches y camiones.

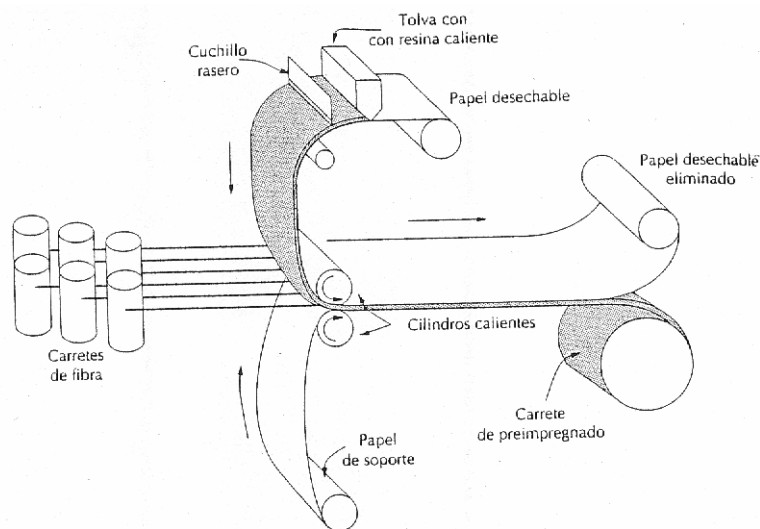


Figura 12.- Preparación de una cinta preimpregnada.

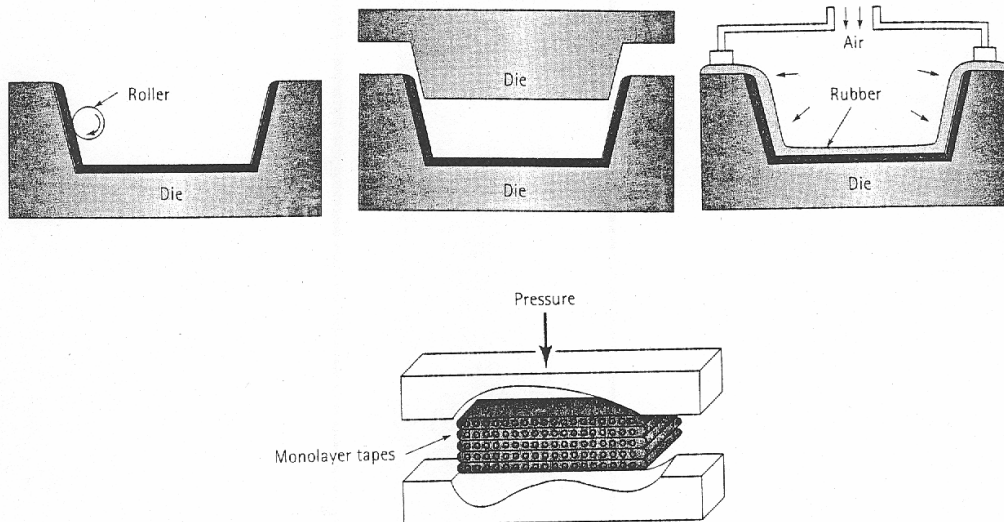


Figura 13.- Fabricación de composites a partir de cintas preimpregnadas.

El **bobinado de filamentos**, es un proceso mediante el cual las fibras se enrollan sobre un molde generalmente cilíndrico, para dar lugar a un entramado sólido que puede llegar a tener hasta 1m. de grosor. Las fibras pueden impregnarse en la matriz polimérica, formando una cinta, antes de su bobinado, o se puede añadir la resina durante el enrollado o incluso después de éste. Posteriormente el material es curado en un horno, o secado a temperatura ambiente, y finalmente se extrae el molde. Se pueden aplicar diferentes tipos de bobinado (circular, helicoidal, polar) para conseguir las propiedades mecánicas deseadas. Es también una técnica rápida y de bajo coste, que permite obtener estructuras ligeras pero de alta resistencia y con gran control sobre la uniformidad del reforzamiento. Se emplea en la fabricación de tanques de almacenamiento, carcasas de motores, tuberías especiales y muchos componentes estructurales.

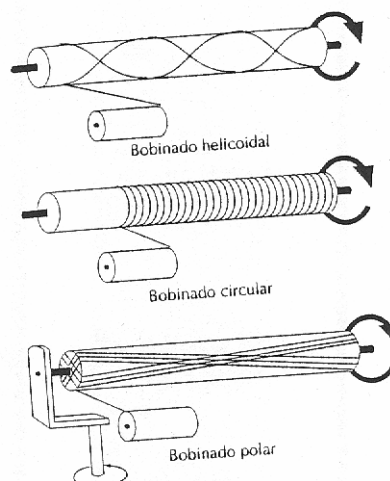


Figura 14.- Diferentes técnicas de bobinado.

Los composites de matriz metálica con fibras continuas son más difíciles de fabricar que los de matriz polimérica. Habitualmente, se utilizan la capilaridad, la presión o el vacío para conseguir que la matriz fundida rellene el entramado fijo formado por las fibras. También puede llevarse a cabo un procedimiento similar a la pultrusión. Es frecuente además, que una vez formadas las preformas simples (laminares) se recurra a un proceso de moldeo y enlace bajo presión y temperatura.

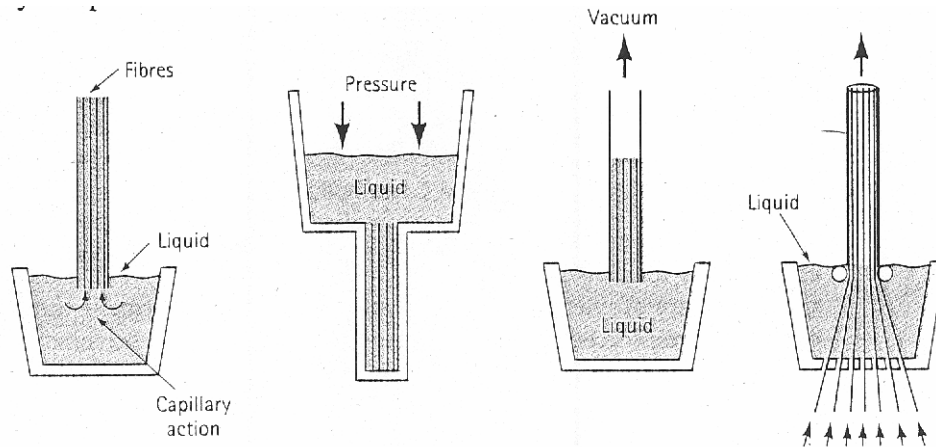


Figura 15.- Técnicas de moldeo para matrices metálicas reforzadas por fibras.

Materiales Laminares

Los composites laminares se caracterizan por su elevada resistencia en todas las direcciones, siendo además ligeros y de bajo coste. Pueden tener también propiedades térmicas interesantes, y generalmente se diseñan para que su resistencia a la abrasión y a la corrosión sea buena.

Los más comunes de estos materiales son los llamados **laminados**, formados por láminas de materiales con elevada resistencia en una determinada dirección (madera, plásticos reforzados con fibras alineadas). Estas láminas se apilan y se pegan entre sí de manera que las direcciones preferentes de elevada resistencia se van alternando. De esta manera el material final tiene una elevada resistencia en todas las direcciones (evidentemente siempre inferior a la que tendría en la dirección preferente si todas las láminas se apilaran con igual orientación). El adhesivo utilizado para unir las láminas es habitualmente un polímero que endurece por calentamiento y presión.

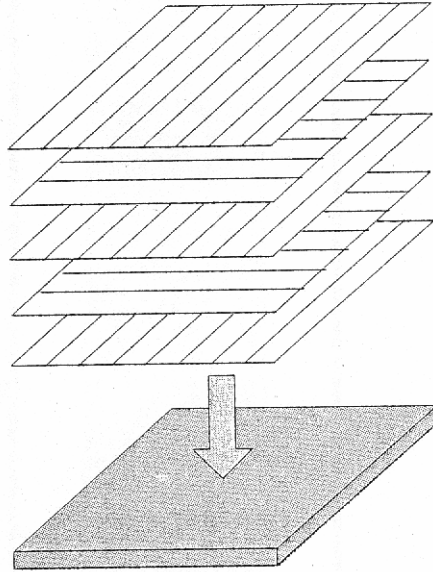


Figura 16.- Fabricación de laminados.

Entre los laminados más habitualmente empleados se pueden citar los vidrios de seguridad, formados por dos láminas de vidrio unidas por un adhesivo plástico que impide que en caso de ruptura salgan despedidos los trozos de vidrio. También se utilizan otros laminados en aislamientos térmicos, eléctricos y sonoros, para embellecer y proteger un material (ej., formica), etc. Mención especial merecen los **microlaminados**, compuestos de láminas de aluminio alternadas con láminas de polímeros reforzados con fibras. Algunos de ellos como el Arall, con láminas de Kevlar muy delgadas adheridas a las láminas de aluminio, se utilizan en los fuselajes de los aviones. Estos compuestos son sumamente ligeros, pero al mismo tiempo muy duros y resistentes a la corrosión, a la fatiga y al impacto. Además, no son afectados por la luz (a diferencia de los polímeros) y se mecanizan y reparan con facilidad.

Los composites laminares metálicos se unen generalmente bajo presión, haciendo pasar las láminas metálicas por un rodillo (en frío o en caliente). De esta manera se logra un contacto íntimo entre superficies y la difusión atómica da lugar a la unión. En ocasiones, sobre todo para láminas de gran superficie que son difíciles de hacer pasar por un rodillo, se utiliza un explosivo para proporcionar la presión necesaria para la unión de los metales. También puede utilizarse una aleación de bajo punto de fusión, que se coloca entre las láminas de forma que al ser calentadas se difunde entre ambas caras y las enlaza fuertemente. Finalmente, puede citarse el método utilizado habitualmente en la fabricación de cables coaxiales, que consiste simplemente en la coextrusión de un metal conductor (generalmente cobre) rodeado de un material aislante y más blando (plomo o un polímero).

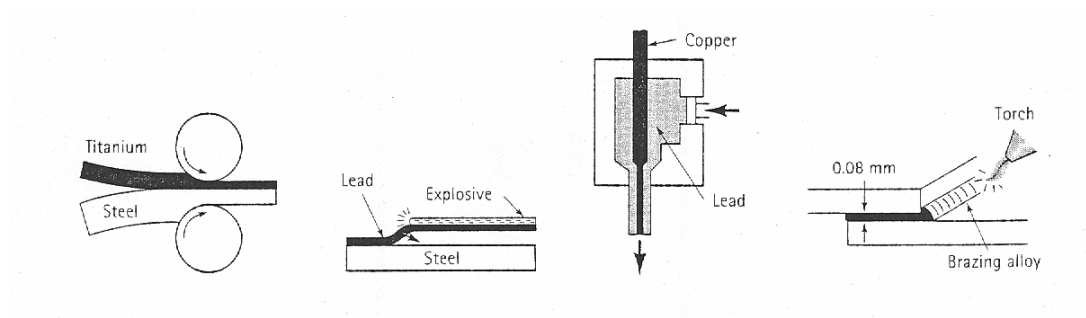


Figura 17.- Fabricación de composites laminares metálicos.

Estas técnicas se utilizan fundamentalmente para revestimientos metálicos, de manera que se consiguen materiales de alta dureza y resistencia a la corrosión, a la vez que se abarata su coste. Así por ejemplo, las mayoría de las monedas plateadas se fabrican a partir de un material laminado que consiste en una capa de una aleación Cu(80%)-Ni situada entre dos capas mucho más delgadas de Cu(20%)-Ni. Otro ejemplo lo constituye el laminado conocido como Alclad, en el que una aleación de aluminio de alta dureza es protegida de la corrosión por dos láminas delgadas de aluminio puro. Esta aleación se utiliza en componentes aeronáuticos, tanques de almacenamiento, intercambiadores de calor, construcción, etc.

Un tipo especial de laminados lo constituyen los **composites bimetalicos** que se utilizan ampliamente como termostatos en sistemas de aire acondicionado y calefacción. Son compuestos formados por únicamente dos láminas rígidamente enlazadas fabricadas en metales con diferentes coeficientes de dilatación térmica. Cuando el sistema se calienta el metal de mayor tendencia a la dilatación “tira” del otro, y el composite se curva. La curvatura es función de la temperatura y puede servir para medir ésta, pero más frecuentemente lo que hace es abrir o cerrar el circuito eléctrico que alimenta la resistencia calefactora del equipo.

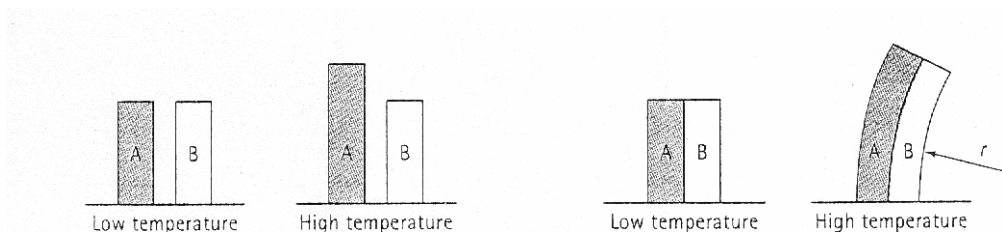


Figura 18.- Dependencia térmica de un composite bimetalico.

Evidentemente, para que el funcionamiento del termostato sea adecuado y duradero se precisa que los materiales tengan una diferencia importante en sus coeficientes de dilatación, que sus expansiones y contracciones sean reversibles y que tengan buenas propiedades elásticas. Normalmente, el metal de baja expansión es una aleación de Fe-Ni, y el de alta expansión es níquel puro.

Estructuras “sandwich”

Las estructuras “sandwich” más comunes constan de dos láminas externas resistentes, llamadas caras, separadas por una capa de material menos denso y resistente, llamado

núcleo. Los materiales de las caras suelen ser de acero, aleaciones de aluminio, titanio, madera, plásticos reforzados e incluso papel. Su misión es resistir las fuerzas sobre el plano y los esfuerzos de flexión transversal. Para el núcleo se utilizan materiales muy ligeros como los polímeros espumosos, caucho, cementos, madera de balsa. Su función es mantener separadas las caras evitando las deformaciones perpendiculares a éstas proporcionando flexibilidad y también aumentar la resistencia a la cizalladura.

La elección de los materiales que van a componer el “sandwich” depende obviamente de la aplicación para la que se dese. Así, uno de los compuestos sandwich más conocidos es el cartón corrugado que se utiliza como protector en embalajes, compuesto por tres capas de papel, dos lisas en el exterior y una interna corrugada pegada a las otras dos. En el otro extremo tenemos las **estructuras en panal** utilizadas en fuselajes y planos estabilizadores de los aviones. En este caso el material utilizado es habitualmente una aleación de aluminio ligera. El núcleo se obtiene pegando entre sí varias láminas corrugadas (formando huecos hexagonales, cuadrados, sinusoidales, etc.) y finalmente al panal se pega una lámina de aluminio de mayor grosor por cada cara. Este conjunto tiene una excelente resistencia con una densidad inferior a los 0.04 g.cm^{-3} . Además los huecos pueden ser rellenos con una espuma polimérica que proporciona además un aislamiento acústico y vibracional muy bueno. Este tipo de estructuras, aunque con materiales menos sofisticados, también se emplean en construcción para techos, suelos y tabiques.

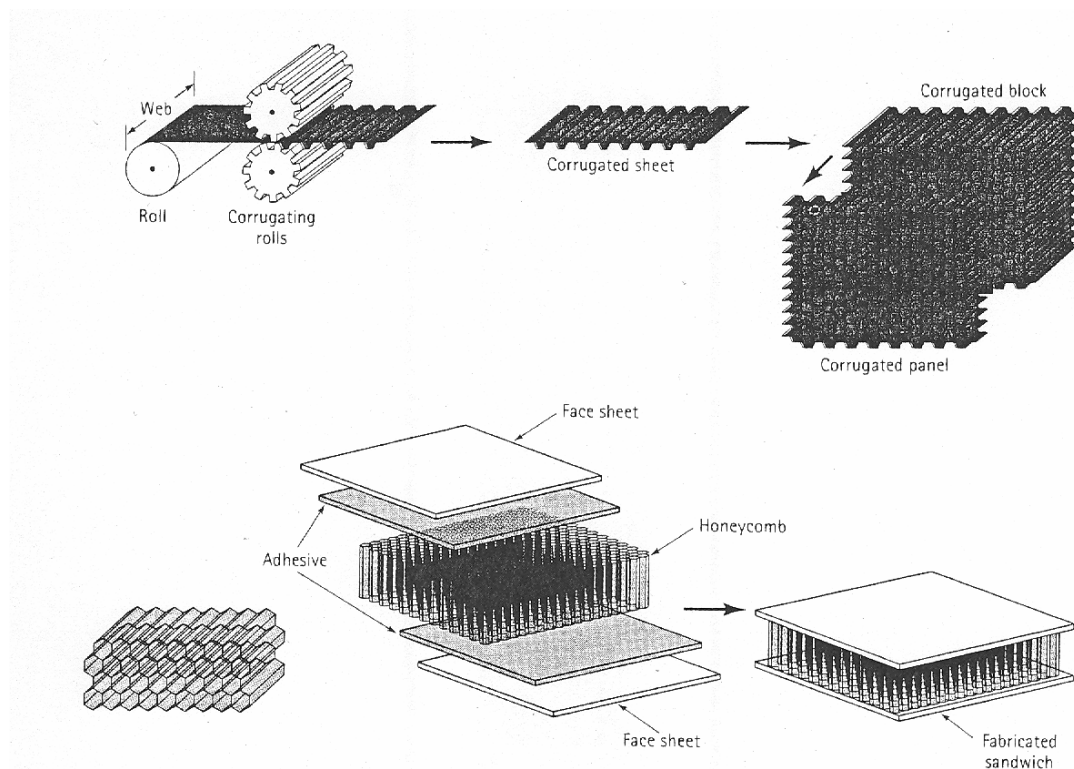


Figura 19.- Fabricación de estructura en panel.

Nuevos Composites de matriz cerámica y matriz metálica

Sobre estos composites se viene investigando intensamente durante los últimos años, habiéndose obtenido un gran número de compuestos. En general, el interés sobre los

mismos se centraba en sus posibles aplicaciones en la industria aeroespacial, pero muchos de ellos se utilizan ya en otro tipo de industrias, y en especial la del automóvil.

Los **composites de matriz metálica** se refuerzan generalmente con fibras, cerámicas o metálicas, y/o partículas cerámicas. Las matrices empleadas son generalmente aluminio y cobre, especialmente el primero por su elevada ductilidad. El aluminio puede ser reforzado con partículas de alúmina y carburo de silicio, así como por whiskers de este último material. Sin embargo, las mayores resistencias se obtienen reforzándolo con fibra continua de boro, SiC, alúmina o grafito, y también metales como el wolframio. Normalmente no se utilizan fibras poliméricas por su baja resistencia térmica, pero también existe un grupo interesante de materiales, **polymets**, que se producen por extrusión en caliente de polvo de aluminio con polímeros de alta temperatura de fusión. El polímero es obligado a reducirse en una elevada proporción (1000 a 1) de manera que se originan filamentos en una matriz compacta de aluminio.

También las superaleaciones pueden reforzarse con fibras de wolframio o grafito, manteniendo gracias a ello una gran resistencia a temperaturas elevadas. De la misma forma se refuerzan el titanio y sus aleaciones con fibras de carburo de silicio. Estos composites se utilizan habitualmente en motores de aviones y misiles, láminas para turbinas y hélices, etc.

Los **composites de matriz cerámica** son aún más recientes, y normalmente contienen fibras cerámicas como reforzantes. La intención fundamental es aprovechar la alta resistencia térmica de los materiales cerámicos al tiempo que se mejora su resistencia y tenacidad. Así por ejemplo, los **composites carbono-carbono**, los más importantes de estos materiales, pueden trabajar a temperaturas superiores a los 3000 °C, son muy resistentes y además lo son más al aumentar la temperatura. Estos composites se fabrican a partir de resinas fenólicas reforzadas con fibra de carbono. Al pirolizar este precursor, las resinas se convierten en carbono poroso. Este material se vuelve a rellenar de resina y se vuelve a calcinar varias veces hasta que compacta totalmente. Finalmente el material se recubre de carburo de silicio para protegerle de la oxidación. Estos compuestos presentan una extremada dureza e indeformabilidad, utilizándose en coches de Fórmula I, aviones y lanzaderas espaciales. También se preparan este tipo de composites con fibras de alúmina y de carburo de silicio, pero sus propiedades son generalmente menos interesantes.

Curiosamente, en estos materiales se requiere que el enlace entre la matriz y la fibra sea malo para que la resistencia del material mejore, lo que explica el aumento de la resistencia que experimentan con la temperatura. Cuando una grieta llega a una fibra, se propaga a su alrededor debido a la mala conexión con la matriz. Además, las fibras tienden a separarse de la matriz y rellenar las grietas. Ambos efectos absorben energía, de manera que la propagación de la grieta exige una mayor carga y el material es por tanto más tenaz.